

В.И. Галуев

ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА – ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Составной частью региональных исследований являются геофизические работы, обеспечивающие глубинность изучения земной коры и верхней мантии, выяснение причин, условий формирования и закономерностей размещения полезных ископаемых, трехмерность изучения среды. Важной особенностью исследований, проводимых в последние годы, является широкое внедрение информационных технологий при оценке строения земной коры комплексом геофизических методов проведения поисково-прогнозных работ.

Повышение эффективности интерпретации геофизических данных в условиях сложно построенных аномальных полей континентальной литосферы, обуславливает необходимость комплексной интерпретации экспериментальных данных на основе создания геоинформационной системы интегрированного анализа геофизических данных при изучении глубинного строения Земли.

Региональные геофизические исследования проводятся как на основе площадных специализированных и комплексных геофизических исследований, так и по отдельным опорным профилям. Они включают измерение потенциальных и электромагнитных полей, сейсморазведочные работы. Поэтому система интегрированного анализа и интерпретации геофизических данных при изучении глубинного строения Земли должна обеспечивать как обработку площадных данных, так и построение распределения физических параметров среды по разрезам, изучение их объемного распределения (3D).

Компьютерные технологии количественной комплексной интерпретации ориентируются, прежде всего, на сейсмическую модель геосреды [6]. Анализ существующих автоматизированных систем и ГИС-технологий комплексного анализа геоданных показывает отсутствие компьютерных технологий комплексной интерпретации геофизических данных при изучении глубинного строения, позволяющих согласовывать результаты методных интерпретаций по комплексу физических полей волнового (сейсмического), электрического, гравитационного и магнитного. Разработка системы комплексной интерпретации, которая позволяет при обработке учитывать результаты независимой интерпретации данных отдельных геофизических методов и соответствующих им моделей является весьма актуальной проблемой. С этой целью в лаборатории геоинформатики ВНИИгеосистем создана геоинформационная система

интегрированной интерпретации геофизических данных для изучения глубинного строения земной коры – ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА.

ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА разработана для обработки и интерпретации геофизических данных при решении широкого круга геологических задач на разных стадиях геологоразведочного процесса. Отличительной ее особенностью является ряд программных и технологических процедур, позволяющих реализовать методику интерпретации данных комплекса геофизических методов при изучении глубинного строения земной коры.

Основная цель комплексной интерпретации геофизических полей при изучении глубинного строения определяется построением согласованной по всем полям комплексной физико-геологической модели земной коры. Эффективность интегрированной интерпретации достигается вовлечением в процедуру комплексного анализа различных методных моделей с дальнейшим согласованием геометрических и физических параметров этих моделей.

При этом ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА обеспечивает решение следующих задач:

- построение слоисто-блоковых моделей земной коры с выделением реперных физико-геологических границ осадочного чехла, кристаллического фундамента, Конрада, Мохоровичича;
- выделение и прослеживание зон нарушения сплошности среды, зон повышенной трещиноватости и расслоенности с возможным флюидонасыщением;
- прогноз вещественного состава горных пород земной коры;
- типизация моделей земной коры по физико-геологическим признакам и их сопоставление с особенностями строения известных месторождений полезных ископаемых;
- определение глубинных критериев минерагенического прогноза минерального и углеводородного сырья.

ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА создавалась как система, обеспечивающая обработку и интерпретацию данных комплекса геофизических методов, используемого при изучении глубинного строения земной коры (гравиразведки, магниторазведки, электроразведки (МТЗ, АМТЗ), сейсморазведки (ГСЗ, МОВ-ОГТ)), поскольку решение указанных выше геологических задач возможно на базе:

- изучения природы сейсмических волн и оценки их параметров с определением сейсмо-геологических характеристик разреза земной коры на всю ее мощность (до границы Мохоровичича);

- анализа потенциальных полей для выделения и прослеживания плотностных и магнитоактивных границ, с целью описания разреза земной коры плотностными и магнитными параметрами;
- изучения электромагнитных параметров земной коры для выделения зон повышенной проводимости.

Сформулируем положения и принципы, которые были использованы при построении технологии интегрированного анализа геофизических данных при изучении глубинного строения, а также его информационного и математического обеспечения.

К ним относятся:

1. Общие принципы системного анализа: **модельность** исследований, то есть построение модели при решении конкретных геолого-геофизических задач, **системность** исследований, то есть анализ моделей как систем с установлением для них априорных сведений и ограничений, **оптимальность**, сводящаяся к выбору и выработке критериев принятия решений [4].
2. Принципы интегрированного анализа геоинформации [3], которые определяют выполнение комплексной интерпретации геоинформации на основе определенных критериев и **принципов информативности и адаптивности**. В соответствии с физическими, химическими, геологическими основами каждый вид и метод геологоразведочных работ характеризуется собственной геологической информативностью. Оценка последней может быть получена «от противного»: разнообразием моделей объекта, неразличимых отдельным методом. В результате использования комплекса геофизических методов возникает многообразие отображений объекта в полях различных параметров. Обусловленность этого многообразия контрастом объекта с вмещающей средой, в совокупности с его генезисом и актуальным состоянием, представляют собой основу для интегрирования геоинформации. Для выполнения интегрирования необходимо установление закономерностей указанной обусловленности. Тем самым, постулируется одна из важнейших функций интегрированного анализа: синтез критериев интерпретации комплекса геоданных. Принцип адаптивности отражает зависимость одного из основных факторов интегрированного анализа – характеристик вида (метода) ГРП (разрешающая способность, помехоустойчивость, состав и однозначность оценок параметров) от текущего состояния модели объекта, степени его изученности. Тем самым предопределяется итеративный процесс решения задач анализа.

3. Принципы, определяющие комплексную обработку геофизических данных в ГИС ИНТЕГРО Геофизика при изучении глубинного строения можно сформулировать следующим образом.

Принцип независимости интерпретации данных отдельных геофизических методов. Система ориентированна на выделение источников, проявляющихся как в одном, так и одновременно в нескольких полях. Поэтому на начальном этапе определяются параметры источников каждого из геофизических полей, что позволяет также более объективно (или полно) извлекать информацию из данных каждого геофизического метода.

Принцип согласования определяет подход к комплексной интерпретации, при котором проводится согласование методных моделей с целью получения обобщенной модели, учитывающей все источники аномальных эффектов разных физических полей.

Принцип относительности характеристик при проведении комплексной интерпретации предполагает, что данные различных методов должны быть преобразованы к относительным характеристикам, позволяющим проводить согласование методных моделей.

При этом учитываются такие *особенности геофизических полей*, как их интегральный характер и пространственно-временные изменения. При регистрации геофизических полей изучают эффективные характеристики геологической среды, поскольку геологические среды резко неоднородны и гетерогенны, многокомпонентны и многоэлементны. Значения этих характеристик изменяются в пространственно-временных координатах [5]. К особенностям геофизических полей относится предположение о том, что в земной коре границы неоднородностей, достаточно крупных по размеру и контрастных по физическим свойствам, должны быть совместимы в разных монометодных моделях с учетом оценки возможной неопределенности (погрешности) определения их геометрии.

Рассмотренные методологические аспекты позволяют сформулировать необходимые условия построения системы, реализующей методику и технологию изучения глубинного строения земной коры.

Информационной базой геолого-геофизических исследований при изучении глубинного строения земной коры являются пространственно-привязанные данные различных типов – геологические карты, разрезы, результаты наблюдений в скважинах, геофизические данные разных методов, поэтому организация взаимосвязи между ними и оперирование ими строились в форме геоинформационной системы. В основу системы интегрированной интерпретации геофизических данных при изучении глубинного

строения Земли – ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА, положена система ГИС ИНТЕГРО, являющаяся геоинформационной системой функционирования разнообразных вычислительных и аналитических приложений при решении различных геологических задач (рис. 1). ГИС ИНТЕГРО включает в себя многообразные интерфейсы, позволяющие изменять форму представления данных (растр, вектор, регулярная и нерегулярная сеть наблюдений), блок преобразования картографических проекций, а также прикладные блоки, включающие блок интегрированного анализа данных и решения прогнозно-диагностических задач.

ГИС ИНТЕГРО Геофизика содержит программно-технологическое обеспечение решения задач анализа и обработки двух и трехмерных массивов геофизической информации (волновых и потенциальных полей, результатов обработки МТЗ) [2], включая процедуры фильтрации, статистического анализа (оценка распределений, статистик как по массивам в целом, так и в скользящих окнах), решение прямых и обратных задач грави- и магниторазведки, распознавание образов в различных постановках, расчет различных модификаций градиентных характеристик, в том числе нормированных, как необходимого инструмента интегрирования разнородной геофизической информации.

Система оснащена средствами конвертирования данных, зарегистрированных различными геофизическими методами, в единую геоинформационную среду, так как при изучении глубинного строения Земли основной функцией ГИС ИНТЕГРО Геофизика является интеграция геофизических данных, обрабатываемых разными программными комплексами. Так, данные сейсморазведки и МТЗ обрабатываются специализированными средствами. Для этого используются программно-методический комплекс «ИНТЕГРАН» (С.А. Каплан, А.Я. Иксанов и др. [ВНИИгеосистем]), система интегрированной обработки данных сейсморазведки МОВ-ОГТ VELINK (В.М. Глоговский, ООО «Геотехсистем»), системы обработки данных МТЗ: MTS-Prof (ООО «Северо-Запад»), WinGeo LINK (GeoSystem, Италия). Кроме того, при обработке потенциальных полей используются элементы программного комплекса «Sigma-3D» (Ю.И. Блох, ОАО «Аэрогеофизика»). Со всеми указанными программными комплексами в ГИС ИНТЕГРО Геофизика организован информационный обмен данными.

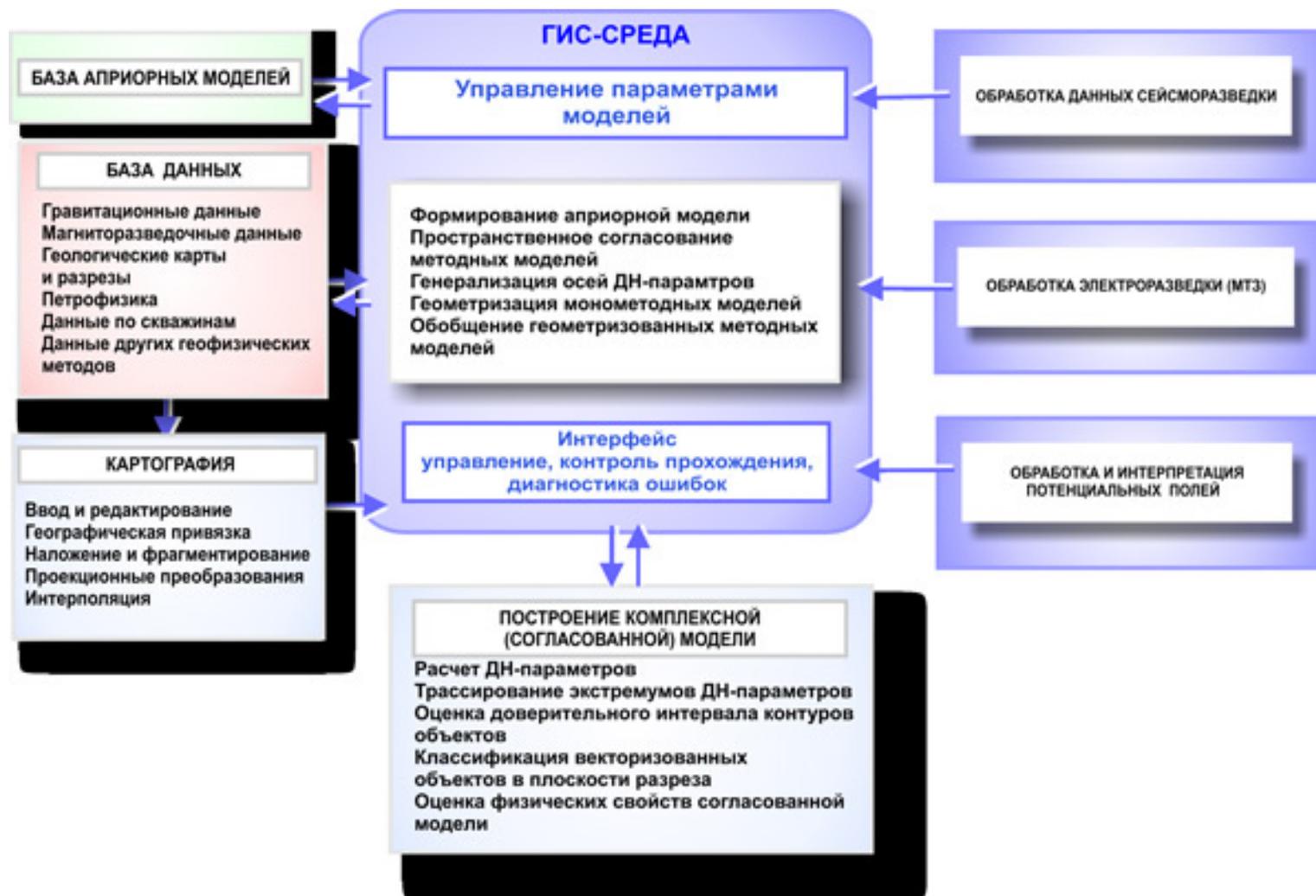


Рис. 1. Структура ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА

В настоящее время ГИС ИНТЕГРО-ГЕОФИЗИКА представляет собой интерактивную систему, в полной мере использующую возможности Windows XP и информационно-аналитической среды ГИС ИНТЕГРО. ГИС ИНТЕГРО Геофизика является открытой и легко расширяемой системой.

ГИС ИНТЕГРО Геофизика позволяет реализовать общую схему обработки и интерпретации геофизических данных при изучении глубинного строения Земли, которая включает следующие процедуры:

- формирование информационного обеспечения и априорной физико-геологической модели;
- построение моделей среды на основе данных отдельных геофизических методов, включая оценку геологической информативности каждого метода исследований;
- построение модели земной коры по комплексу физических и геометрических параметров;
- построение геологической модели земной коры и осадочного чехла;
- прогноз зон и областей по региональному профилю и его окрестности, благоприятных для скопления полезных ископаемых.

В соответствии с указанными выше принципами монометодные модели глубинного строения земной коры получаются в результате углубленной обработки, постобработки и интерпретации данных каждого геофизического метода – сейсморазведки, гравиразведки, магниторазведки, электроразведки.

Обработка и интерпретация потенциальных полей. Основной целью обработки потенциальных полей является получение 2-D и 3-D моделей распределения эффективной плотности и магнитной восприимчивости в земной коре.

Для этого в блок обработки и интерпретации потенциальных полей включены программы, реализующие статистическое зондирование геополей в скользящих окнах с получением трехмерных статистических моделей, которые дополняются пакетом программ, локализации особых точек и комплексной интерактивной интерпретации профильных данных, реализующих 2.5-мерные трансформации в прямоугольном скользящем окне с вычислением однозначно определяемых параметров магнитного и гравитационного полей, утилита вычисления объемного распределения эффективных параметров в нижнем полупространстве спомощью спектрального анализа, программы трехмерного комплексного моделирования данных потенциальных методов (Блох Ю.И. «Аэрогеофизика».

Обработка и интерпретация данных электроразведки (МТЗ) обеспечивает весь технологический цикл построения методной модели – глубинного геоэлектрического разреза.

Обработка и интерпретация сейсморазведочных данных реализует расширение возможностей классификации сейсмических образов, качественно соответствующих типовым элементам литосферы и возможности ее районирования по геотектоническим, геодинамическим и другим характеристикам, изучение и количественную оценку параметров сейсмических моделей литосферы, выполняемых на нескольких уровнях детальности их анализа, методико-технологическое обеспечение обработки и интерпретации, адаптированного к специфическим условиям применения сейсморазведки МОГТ в интересах изучения земной коры.

Создание комплексных моделей глубинного строения земной коры проводится на основе согласования границ, зон тектонических дислокаций и изменения петрофизических свойств, определяемым по монометодным моделям (сейсмическим, электромагнитным, магнитным и гравитационным).

Пространственное согласование методных моделей. Первым этапом построения комплексной модели земной коры является пространственное согласование методных моделей, которое подразумевает взаимную увязку результатов методной интерпретации как в плоскости наблюдений, так и по глубине.

В ГИС ИНТЕГРО Геофизика созданы технологические средства, позволяющие эксперту проводить проецирование методных моделей на единый профиль. При геофизических исследованиях по геотраверсам необходимость такой увязки в плоскости наблюдений вызвана тем, что профили наблюдений разными геофизическими методами, призванные осветить строение по одному региональному профилю, по ряду геоморфологических и технических причин не совпадают. Методные модели, участвующие в комплексной интерпретации, по оси глубин могут иметь псевдоглубинные параметры, например, временной разрез в сейсморазведке. Экспертное изменение шкалы глубин дает возможность согласовать модели в нижнем полупространстве.

Геометризация методных моделей. Для создания комплексных геофизических моделей глубинного строения территорий в ГИС ИНТЕГРО Геофизика разработаны процедуры установления опорных границ изменения физических свойств геологического пространства с выделением областей интегрально устойчивых геофизических полей по глубине и латерали земной коры и верхней мантии.

В системе осуществляются следующие процедуры согласования методных моделей:

- геометризация монометодных моделей, отображающая структурные особенности строения коры с локализацией возможных зон нарушений сплошности среды;
- согласование геометризованных монометодных моделей для установления генерализованных границ раздела в земной коре;
- оценка физических свойств (характеристики среднего и дисперсии) согласованной модели.

Учитывая, что при сейсмической обработке данных СОГТ широко используются сейсмоэнергетические преобразования или оценки энергии рассеянных волн (для моделей гетерогенных сред), в ГИС ИНТЕГРО Геофизика для сопоставления с ними гравимагнитометрических и электроразведочных данных обеспечивается расчет дифференциально-нормированных (ДН) параметров, которые являются производными по глубине от логарифма жёсткости, плотности, намагниченности, сопротивления [1].

ДН-параметром в сейсморазведке является коэффициент отражения $K_{отр} = \frac{d}{dz} [\ln(V \cdot \sigma)] dz$, где V – скорость распространения сейсмической волны, σ – плотность;

в гравиразведке $ДНП_{гр.} = \frac{d}{dz} [\ln(\sigma)] dz$, где σ – плотность;

в электроразведке $ДНП_{эл.} = \frac{d}{dz} [\ln(\rho)] dz$, где ρ – удельное электрическое сопротивление.

Экстремумы этих параметров приурочены к границам резкой смены соответственно сейсмической жёсткости, сопротивления, плотности. Выделение в пространстве разреза плотностных границ (либо границ резкого изменения намагниченности, электропроводности) осуществляется на основе оценки точности получения этого параметра. На основе оценки этой точности формируется нижняя граница выделения ДН-параметра.

В силу того, что ДН-параметры представляют собой распределение безразмерных величин, они могут сопоставляться между собой и с сейсмическим разрезом прямым наложением с применением визуальных способов анализа, а также совместной обработкой с получением количественных корреляционных оценок связи этих параметров. Для количественной совместной обработки модели приводятся к единой сетке. Количественная оценка связи между сейсмическими и трансформированными плотностными параметрами позволяет районировать плоскость разреза на области с положительной корреляционной и отрицательной связями и областями, где связь между параметрами отсутствует. Интерпретация результатов такого районирования дает возможность скорректировать положение границ глубинно-скоростной модели, учитывая

их характер, и, соответственно, модифицировать значения интервальных скоростей. Преобразование плотностных разрезов к разрезам ДН-параметрам позволяют на этих разрезах выделять опорные «отражающие» горизонты, приуроченные к окрестности сейсмических границ, а также спрогнозировать зоны нарушения сплошности среды.

ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА содержит средства, обеспечивающие формализованную геометризацию ДН-параметров: плотности, намагниченности, электропроводности. Для этого картируются приращения градиентов физических характеристик, в виде областей наиболее резких изменений свойств среды. На разрезах они проявляются положительными или отрицательными экстремумами. Трассирование последовательности экстремумов проводится с учетом неопределенности их положения по глубине. С этой целью по разрезам ДН-параметров плотности, намагниченности и электропроводности проводится трассирование осей экстремумов градиента логарифма физических свойств. Результатом такой операции является поле отрезков, отражающих поведение осей экстремумов. Затем применяются процедуры генерализации линейных элементов, обеспечивающие построение окончательных границ на разрезах методных моделей.

Получение параметров комплексной (согласованной) модели. Для получения комплексной (согласованной) модели земной коры по совокупности геофизических характеристик в ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА осуществляются следующие процедуры:

- построение тектонического каркаса модели путем локализации по комплексу характеристик в разрезе наклонных и субвертикальных контактных зон;
- формирование границ изменения свойств объектов на основе решения классификационных задач в плоскости разреза;
- получение осредненных оценок физических свойств в пределах выделенных квазиоднородных объектов различного уровня генерализации.

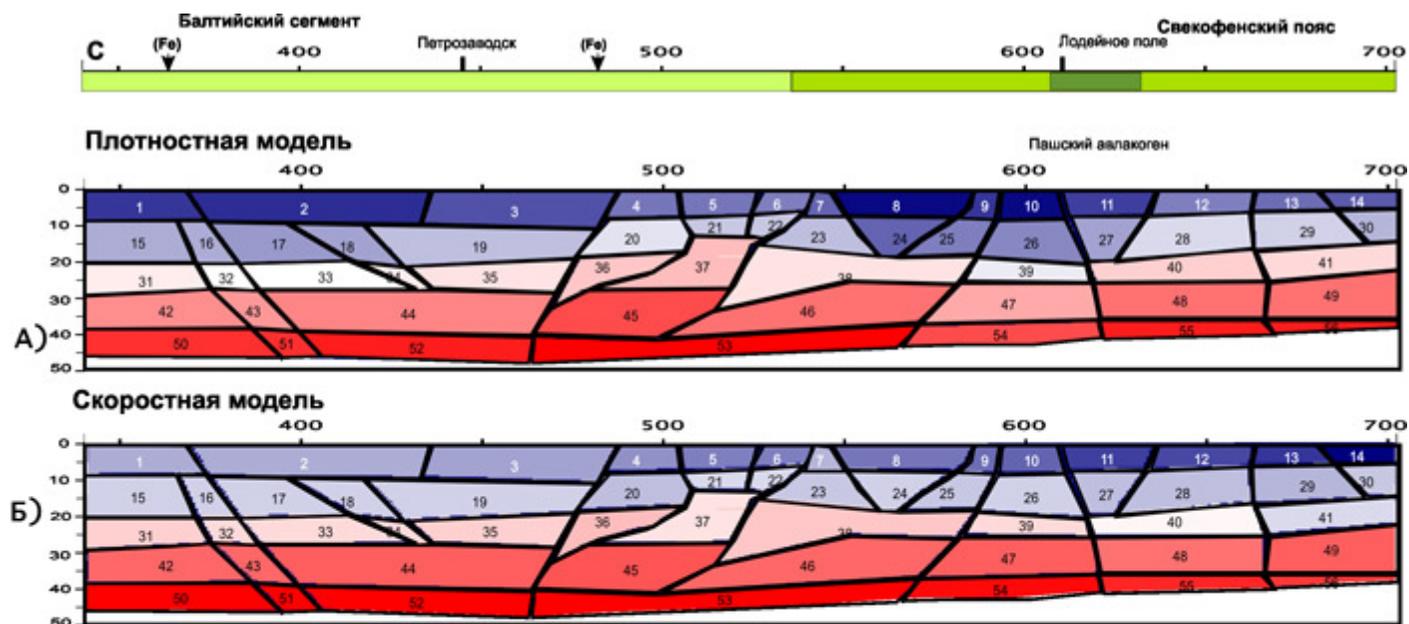
Для получения единой согласованной физико-геологической модели в ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА предусмотрено получение статистических характеристик (среднего, дисперсии) для каждого физического свойства в пределах замкнутых контуров геометрической модели, что позволяет осуществить разбиение пространства на квазиоднородные области по эффективным параметрам среды, значениям комплексного параметра и различным статистическим показателям.

Построенный таким образом разрез является переходным этапом между результатами геофизических исследований и их геологической интерпретацией. Он позволяет, с одной стороны, выделить структурно-вещественные комплексы, которые в дальнейшем могут быть преобразованы в геологические категории. С другой стороны,

этот разрез дает возможность осуществить многовариантность геологической интерпретации, и позволяет другим исследователям, придерживающимся другой геотектонической ориентации, предложить свое видение геологической обстановки и предложить свой сценарий тектонического развития района.

Для оценки качества построений на последнем этапе обработки в ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА используется решение прямой задачи для источников потенциальных полей.

ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА реализована при изучении глубинного строения по материалам комплексных исследований на опорных профилях 1-ЕВ, 1-СБ, 2-СБ, 3-СБ, 2-ДВ. Пример согласованной модели, полученной в результате интегрированной интерпретации геофизических данных по участку профиля 1-ЕВ, приведен на рис. 2. Установлена эффективность предложенных технологических решений и возможность реализации крупных проектов.



Распределение значений физических параметров по классам

N	Средняя плотность	Средняя скорость									
1	2,62643	5641,73	15	2,71026	5815,11	29	2,73672	5687,74	43	2,84638	6795,58
2	2,62005	5621,85	16	2,70967	5820,76	30	2,71721	5783,66	44	2,86128	6856,59
3	2,64731	5560,79	17	2,69857	5802,6	31	2,78673	6262,07	45	2,90381	6885,37
4	2,67304	5478,72	18	2,70498	5803,43	32	2,77495	6235,36	46	2,87241	6788,03
5	2,67428	5363,99	19	2,72715	5795,77	33	2,7765	6238,4	47	2,83438	6861,18
6	2,67691	5387,61	20	2,75253	5731,66	34	2,7849	6218,46	48	2,87421	6766,85
7	2,65951	5659,62	21	2,73506	5837,43	35	2,79614	6304,28	49	2,8752	6850,3
8	2,5895	5315,84	22	2,73377	5874,89	36	2,81412	6378,05	50	2,92508	7352,13
9	2,62093	5299,62	23	2,72379	5752,71	37	2,82052	6166,54	51	2,92505	7356,35
10	2,5895	5236,42	24	2,65831	5814,9	38	2,79133	6343,74	52	2,93892	7331,66
11	2,63131	5051,18	25	2,68177	5763,12	39	2,75953	6249,77	53	2,96002	7316,45
12	2,67653	5085,59	26	2,68706	5788,09	40	2,80745	6087,97	54	2,89976	7269,08
13	2,6637	4989,57	27	2,70877	5703,59	41	2,79879	5858,29	55	2,93462	7123,22
14	2,6482	4691,8	28	2,74866	5693,27	42	2,85718	6824,89	56	2,93678	7023,92

Рис. 2. Обобщенная глубинная модель земной коры по фрагменту профиля 1-EV:
а – геоплотностная модель,
б – глубинно-скоростная модель

Литература

1. *Галуев В.И., Каплан С.А., Черемисина Е.Н., Малинина С.С.* Методика выделения опорных глубинных границ изменения физических свойств для решения задач интегрирования геоинформации при региональных геофизических исследованиях. *Геоинформатика*, № 1, 2004, Москва.
2. *Галуев В.И., Черемисина Е.Н., Малинина С.С.* Функциональное обеспечение унифицированной системы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных на региональных профилях. М., *Геоинформатика*, № 1, 2001, с. 19-24.
3. *Гильберштейн П.Г., С.А.Каплан, Л.А. Афанасьева.* ИНТЕГРАН – система интегрированного анализа геоинформации. – в кн. «Оптимизация поисково-разведочных работ на нефть и газ на основе интегрированного анализа геоинформации на уровнях «земля-скважина», М., ВНИИГеоинформсистем, 1990, 184 с.
4. *Кузнецов О.Л., Никитин А.А.* *Геоинформатика*. – М.: Недра, 1992. – 302 с.
5. *Кузнецов О.Л.* Интегрированный системный анализ многоуровневой геологической, геофизической и геохимической информации. – Сб. научн. Тр. Комплексирование аэрокосмических, сейсмических, геохимических и скважинных геофизических методов при поисках и разведке нефти и газа. М. ВНИИГеоинформсистем, 1986, с. 4-18. 2.
6. *Никитин А.А., Черемисина Е.Н.* Компьютерные технологии комплексной интерпретации геолого-геофизических данных: современное состояние и перспективы. – *Геоинформатика*, № 3, 2000.